

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231007

# 基于功率自反馈迭代的光伏直流并网系统交流故障有功控制

李俊涛, 贾科, 董学正, 毕天姝

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

**摘要:** 交流电网发生故障后, 光伏直流并网系统须进入低电压穿越模式并降低光伏单元有功出力, 以避免直流母线过压。然而, 电网电压深度跌落时, 光伏单元控制环路切换可能产生倒流, 甚至损毁光伏阵列。为此, 提出基于功率自反馈迭代的光伏直流并网系统交流故障有功控制策略。利用光伏阵列 PU 特性曲线构建端口电压参考值迭代算式, 并根据光伏单元输出功率反馈更新该参考值。同时提出了单机尽限利用的分配方案, 以合理选择参与功率控制任务的光伏单元。所提方法的优点在于无须切除光伏单元控制环路, 能够可靠计算光伏阵列端口电压参考值。仿真验证表明所提方法能够有效实现系统降有功的控制目标, 并减小模式切换过程中光伏单元直流变流器低压侧的电流波动量, 为系统低电压穿越的可靠实现提供保障。

**关键词:** 光伏直流并网系统; 交流故障; 有功控制; 迭代计算; 功率自反馈

## Active power control strategy for a photovoltaic DC grid-connected system based on power self feedback iteration in an AC fault

LI Juntao, JIA Ke, DONG Xuezheng, BI Tianshu

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources  
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

**Abstract:** After a fault occurs in the AC power grid, the photovoltaic (PV) DC grid-connected system (PV-DCGS) needs to enter the low voltage ride-through (LVRT) mode and reduce the active power of PVs to avoid DC bus overvoltage. However, when the grid voltage drop is deep, the control loop switching of the PVs can cause current backflow, and even damage to the PV panel. Therefore, this paper proposes an AC fault active power control strategy for PV-DCGS based on power self-feedback iteration. Using the PU characteristic curve of PV, an iterative formula of the port voltage reference value is constructed, and the reference value is updated according to the output power feedback of PV. At the same time, the distribution scheme of single-machine maximum utilization is proposed to rationally select the PVs that could participate in the power control task. The advantage of the proposed method is that it does not need to cut off the control loop of the PVs, and it can reliably calculate the port voltage reference value of the PVs. Simulation verification shows that the proposed method can reduce active power in the system and reduce the current fluctuation on the low-voltage side of the DC converter of PV during the PV's mode-switching process, providing a guarantee for the reliable implementation of LVRT in the system.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52277097).

**Key words:** PV-DCGS; AC fault; active power control; iterative calculation; active power self-feedback

## 0 引言

光伏直流并网系统具有可减少电缆数量、提升电能质量的优势, 正在成为光伏基地经济建设和发电高效利用的新模式<sup>[1-5]</sup>。根据光伏电站并网标准<sup>[6]</sup>,

光伏发电必须具备低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)<sup>[7]</sup>能力, 在电网电压跌落时提供动态无功支撑, 并减少有功输出。此外, 根据工程现场数据显示, 运行 3~5 年的光伏电站中防反二极管损坏率约为 2%~4%。这使得电网电压深度跌落下光伏单元切换控制环路(含 PI 控制器)时, 可能导致其直流变流器(DC converter, DCC)低压侧(光伏阵列端口)电

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52277097)

流倒送,甚至损毁光伏阵列。因此,研究适用于光伏直流并网系统中光伏单元的有功控制方法至关重要。

交流电网故障下光伏直流并网系统可通过卸荷装置消纳或变流器内部控制的方式,实现直流系统内有功平衡。卸荷装置有直流斩波器<sup>[8-10]</sup>和储能装置<sup>[11-13]</sup>等。卸荷装置能够快速实现直流系统内盈余有功的消纳,但其投资成本较高且增加了运维复杂度。当光伏直流并网系统规模较小时,光伏单元可在中央控制器协调下配合并网变流器(grid connected converter, GCC)快速控制有功出力,故可不依赖卸荷装置。

变流器内部控制通过改变发电单元内部控制器指令或切换控制环路,实现降有功控制。光伏单元的有功出力控制可进一步分为电流控制法<sup>[14-18]</sup>和电压控制法<sup>[19-21]</sup>。电流控制法是将光伏单元从最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制模式切换至定电流控制或定功率控制模式<sup>[16]</sup>。此类方法控制切换范围较大(需要切除外环,甚至含内外环的整个控制环路),降功率运行时可能导致光伏单元 DCC 低压侧出现较大的电流波动(光伏单元内防反二极管失效时,甚至出现倒流),而对光伏阵列造成损坏。电压控制法是通过电压量(直流母线电压或光伏阵列端口电压)进行控制,从而实现降功率目标。文献[19]设计了一种限电压控制器,直流母线电压超出设定阈值时,光伏单元 DCC 切换至定直流电压控制模式,从而降低有功出力。此类方法仍需要切换控制环路,且难以实现对有功输出的准确控制。文献[20]提出了一种限功率控制环,该方法根据电网电压变化和功率反馈环节计算光伏阵列端口电压偏移量,从而控制光伏单元有功出力。此类方法需要在 MPPT 控制的输出电压中叠加电压偏移量,增加了新的反馈控制环节,对光伏单元控制器的要求较高。

综上,采用变流器内部控制方法时,如何不增加光伏单元控制器复杂度,并减小控制模式切换带来的光伏单元 DCC 低压侧电流波动,从而可靠实现交流故障下光伏单元有功出力控制成为难点。

针对上述问题,本文在分析光伏阵列出力特性的基础上,提出一种基于功率自反馈迭代的光伏直流并网系统交流故障有功控制策略。该方法利用光伏单元输出功率的自反馈迭代计算,获取所需的光伏阵列端口电压参考值,从而实现系统功率指令的可靠跟踪。此外,通过设计以单机尽限利用为原则的分配方案,实现系统降功率额度在多个光伏单元中的合理分配。所提方法仅改变光伏单元电压参考

值指令生成方式,无须切除控制环路。仿真结果表明,所提方法能够可靠计算光伏阵列端口电压参考值,无须切除光伏内部控制环路,解决了交流故障下光伏单元控制模式切换导致的低压侧电流波动问题。

## 1 光伏直流并网系统架构与低穿控制

### 1.1 系统架构

本文以云南某实际工程为参照,构建光伏直流并网系统,其拓扑如图 1 所示。该系统的光伏单元 DCC 采用了输入串联输出并联的结构(拓扑结构见附录 A 图 A1),光伏单元直流升压后接入 $\pm 10$  kV 系统。多个光伏单元在中压直流侧汇集后,经 GCC 并入交流电网。各光伏单元与中央控制器间采用光纤通信。图 1 中,  $u_{pv}$  和  $i_{pv}$  分别为光伏阵列端口电压和输出电流。

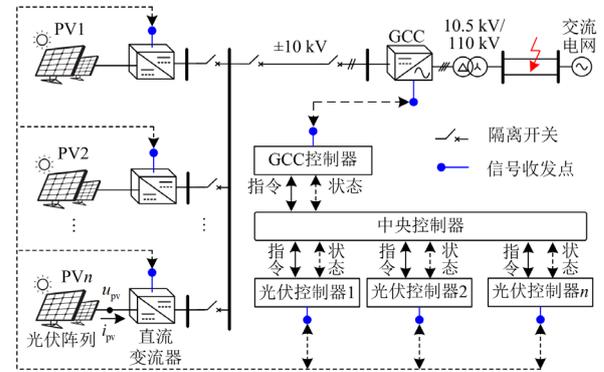


图 1 光伏直流并网系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PV-DCGS

交流电网电压正常时, GCC 采用定直流电压控制稳定直流母线电压,光伏单元 DCC 执行 MPPT 控制保障系统发电效率。交流电网电压暂降时, GCC 进入 LVRT 控制模式,并向交流电网提供动态无功支撑,同时减少自身有功输出;此时,光伏单元 DCC 须配合 GCC 进入降功率控制模式,以避免直流母线电压持续抬升。

### 1.2 系统 LVRT 控制

电网电压暂降时, GCC 所需注入的无功电流  $i_{qref}$  与电网电压之间满足式(1)<sup>[6]</sup>。

$$\begin{cases} i_{qref} = 0, & U^* > 0.9 \\ i_{qref} \geq 1.5I_N(0.9 - U^*), & 0.2 \leq U^* \leq 0.9 \\ i_{qref} \geq 1.05I_N, & U^* < 0.2 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $I_N$  为额定电流;  $U^*$  为并网点电压标幺值。

为避免 GCC 过流, GCC 的有功电流参考值  $i_{dref}$  应设置为

$$i_{dref} = \sqrt{(k_{max} I_N)^2 - i_{qref}^2} \quad (2)$$

式中,  $k_{\max}$  为过流倍数。系统所需降低的有功额度  $\Delta P = 1.5(u_{dN} I_N - u_d i_{dref})$ , 其中,  $u_d$  和  $u_{dN}$  分别为电网电压  $d$  轴分量的实测值和额定值。

GCC 确定所需降低的功率额度后, 光伏单元需要在中央控制器协调下, 配合 GCC 执行降有功控制。

## 2 系统交流故障有功控制策略

光伏直流并网系统进入 LVRT 模式后, 须选定参与降功率控制的光伏单元, 并将系统所需降低的功率分配至对应的光伏单元。其中, 功率分配考虑了变流器转换效率边界; 光伏单元降功率控制利用了光伏阵列 PU 特性曲线。

### 2.1 光伏阵列出力特性分析

标准光照强度和温度条件下光伏阵列输出有功如式(3)<sup>[22]</sup>所示。

$$P = f(u_{pv}, G, T) = u_{pv} \cdot \{I_{sc} [1 - A_1 (e^{\frac{u_{pv} - DU}{A_2 U_{oc}}} - 1)] + DI\} \quad (3)$$

式中:  $G$  为光照强度;  $T$  为环境温度;  $A_1$  和  $A_2$  分别为标准光照和温度条件下, 由最大功率点电压与电流确定的计算系数;  $I_{sc}$  为光伏阵列短路电流;  $U_{oc}$  为开路电压;  $DI$  和  $DU$  为考虑光照和温度影响的偏差补偿计算式, 标准光照和温度条件下,  $DI = DU = 0$ 。

由极值条件  $dP/du_{pv} = 0$ , 可得

$$I_{sc} (1 - A_1 (e^{\frac{u_{pv} - DU}{A_2 U_{oc}}} - 1)) + DI - u_{pv} \frac{I_{sc} A_1 e^{\frac{u_{pv} - DU}{A_2 U_{oc}}}}{A_2 U_{oc}} = 0 \quad (4)$$

式(4)为超越方程, 即该方程中有无法用自变量的多项式或开方表示的函数, 难以获得解析解。文献[22]采用牛顿法迭代求解出式(4)对应的最大功率点电压  $u_{mpp}$ 。

$$U_{k+1} = U_k - P'(U_k)/P''(U_k) = \frac{i_{pv} + U_k \left( -I_{sc} A_1 \frac{1}{A_2 U_{oc}} e^{\frac{U_k - DI}{A_2 U_{oc}}} \right)}{\left( 2 + \frac{U_k}{A_2 U_{oc}} \right) \left( -I_{sc} \frac{A_1}{A_2 U_{oc}} e^{\frac{U_k - DI}{A_2 U_{oc}}} \right)} \quad (5)$$

式中:  $U_{k+1}$  和  $U_k$  分别为第  $k+1$  和第  $k$  次迭代的光伏阵列端口电压计算值;  $P'(U_k)$  和  $P''(U_k)$  分别为第  $k$  次迭代下  $P$  对  $U$  的一阶和二阶导数。当  $|U_{k+1} - U_k| \leq \varepsilon_0$  ( $\varepsilon_0$  为迭代精度, 通常取  $10^{-1} \sim 10^{-5}$ )<sup>[22]</sup>时, 可取得最大功率点对应的电压, 即  $u_{mpp} = U_{k+1}$ , 此时得到对应的电流数值  $i_{\max}$ , 从而可求得标准光照和温度条件下的最大功率  $P_{\max} = u_{\max} i_{\max}$ 。

由于式(5)在短路电压至开路电压区间内满足

平方收敛条件<sup>[23]</sup>, 因而温度和光照条件一定时, 该式有且仅有一个电压可使得光伏阵列输出最大功率, 即光伏阵列的 PU 特性呈现单峰特性。同时, PU 特性曲线表现出非线性特点, 使得光伏单元进入降功率控制模式时, 难以准确计算所需的端口电压参考值。

### 2.2 基于功率自反馈迭代的光伏单元有功控制策略

根据最大功率点与开路点对应的电压和功率 (光伏单元 PU 特性曲线参见附录 A 图 A2), 构建光伏阵列端口电压与其功率指令值  $P_{pvref}$  间的关系, 如式(6)所示。

$$P_{pvref} = \frac{P_{oc} - P_{mpp}}{U_{oc} - u_{mpp}} (u_x - U_{oc}) \quad (6)$$

式中:  $P_{oc}$  为开路电压对应的功率;  $P_{mpp}$  为最大功率点电压对应的功率;  $u_x$  为待求解的端口电压参考值。

式(6)可进一步修改为端口电压参考值求解算式, 如式(7)所示。

$$u_x = U_{oc} + \frac{U_{oc} - u_{mpp}}{P_{oc} - P_{mpp}} P_{pvref} \quad (7)$$

由光伏阵列出力特性分析可知, 光伏 PU 曲线表现出非线性特征, 因而采用式(7)得到的计算结果与实际有功出力必然存在一定的偏差, 故须对其进行修正。考虑到局部阴影下 (参见附录 A 图 A3), 光伏 PU 特性曲线在标准工况的最大功率点电压左侧表现出多峰特性<sup>[24]</sup>, 因此, 选取 PU 特性曲线最大功率点右侧至开路点区段作为迭代计算区间。此外, 光伏阵列开路电压在不同光照条件和环境温度下存在一定的差别, 但其与最大功率点电压的比例关系近似不变<sup>[25]</sup>, 因而将式(7)修改为式(8)。

$$\begin{cases} u_{pvref}^{k+1} = \frac{1}{\sigma} u_{mpp} + \frac{1}{\sigma} \frac{u_{mpp} - u_{pvref}^k}{P_{oc} - P_k} P_{pvref} \\ u_{pvref}^1 = u_{mpp}(G) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\sigma$  为最大功率点电压  $u_{mpp}$  与开路电压  $U_{oc}$  的比值, 通常取  $0.7 \sim 0.8$ <sup>[25]</sup>, 其与光伏电池类型有关;  $u_{pvref}^k$  和  $P_k$  分别为第  $k$  次迭代时的光伏阵列端口电压参考值及其对应的输出功率;  $u_{mpp}(G)$  为光伏阵列端口电压迭代计算的初值;  $k = 1, 2, \dots, n$ 。

所提方法实现原理示意图见附录 A 图 A4。光伏单元根据模式切换前有功出力和光伏阵列端口电压进行首次迭代计算, 从而获得所需的计算初值。随后, 根据光伏单元输出功率是否达到系统功率指令值来决定是否再次进行迭代计算, 直至输出功率与系统功率指令值误差满足计算精度需求。根据上述

分析可以得到光伏单元 DCC 控制策略, 如图 2 所示。图 2 中,  $u_{pvref}$  为光伏阵列端口电压参考值。

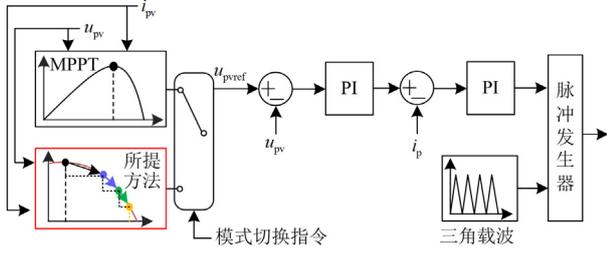


图 2 光伏单元 DCC 控制框图

Fig. 2 Control block diagram of DCC of PV

采用所提方法, 无须切换光伏单元内部控制环路, 仅修改外环参考值计算方式。

### 2.3 系统功率额度分配方法

GCC 所降低的有功额度即直流系统控制的有功裕度, 可根据有功与无功电流关系求得<sup>[26]</sup>, 具体如式(9)所示。

$$\Delta P = P_N - P = P_N - \frac{3}{2} u_d \sqrt{(k_{\max} I_N)^2 - [1.5(0.9 - U^*)]^2 I_N^2} \quad (9)$$

式中:  $P_N$  为额定功率;  $U_N$  为额定电压。

当所需减小的有功小于直流系统内有功出力最大的单台光伏单元的 80%(输出功率低于 20%时, 光伏变流器转换效率将低于 80%)<sup>[27]</sup>时, 则由该光伏单元承担有功控制任务。而当所需减小的有功大于该光伏单元容量的 80%时, 则需要选择多台光伏单元参与有功控制, 具体如式(10)所示。

$$\Delta P = \rho \sum_{i=1}^{j-1} P_{pvi} + \lambda_m P_{pvm} \quad (10)$$

式中:  $\rho$  为转换效率边界系数;  $\lambda_m$  为有功分配系数,  $m = j + 1$ ;  $P_{pvi}$  为第  $i$  个光伏单元的有功出力;  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $j \geq i$ 。

在确定须执行降功率任务的光伏单元及其承担的功率额度后, 则可生成对应光伏单元功率指令。

上述过程可进一步表示为

$$\begin{bmatrix} P_{pvref1} \\ \vdots \\ P_{pvrefj} \\ P_{pvrefm} \\ \vdots \\ P_{pvrefn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{mpp1} \\ \vdots \\ P_{mppj} \\ P_{mppm} \\ \vdots \\ P_{mppn} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} S_1 & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & S_j & & & \\ & & & S_m & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & S_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho P_{pv1} \\ \vdots \\ \rho P_{pvj} \\ \lambda_m P_{pvm} \\ \vdots \\ P_{pvn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中,  $S_j$  为光伏单元选择信号,  $S_j = 0$  时, 该光伏单元不参与有功控制,  $S_j = 1$  时, 该光伏单元参与有功控制。

### 2.4 所提方法实现流程

所提光伏直流并网系统交流故障有功控制策略实现流程如图 3 所示。图中:  $U_{set}$  为模式切换判断阈值;  $\varepsilon_1$  为计算误差阈值(经仿真测试得到)。

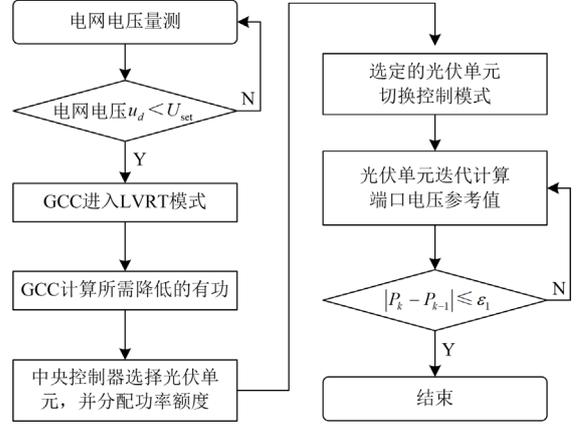


图 3 所提方法实现流程

Fig. 3 Implementation flow chart of the proposed method

如图 3 所示, GCC 检测到电网电压跌落至设定阈值后, 将进入 LVRT 模式, 并向中央控制器上传所需控制的有功额度; 中央控制器结合功率需求和各光伏单元故障前有功出力情况, 计算须参与有功控制的光伏单元及对应减小的有功功率; 光伏单元接收到系统功率指令后, 进入降功率控制模式, 并迭代计算其端口电压参考值, 直至输出功率达到系统指令值。

### 3 仿真验证与结果分析

为验证所提方法的有效性, 本文根据图 1 所示的拓扑搭建仿真模型。并网变流器距离上级电网降压变的交流线路长度为 40 km, 交流线路故障发生设置于该线路中点。其余参数见附录 A 表 A1 和表 A2。

#### 3.1 电网电压正常时所提方法实现效果

对不同光照强度下不同类型和容量的光伏单元有功控制精度进行测试, 所得结果如表 1 所示。

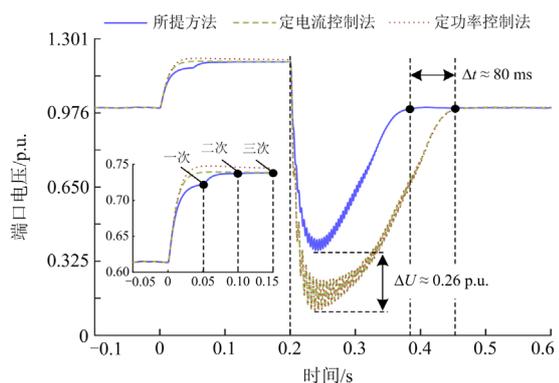
由表 1 可以看出, 不同类型和容量的光伏单元 DCC 在采用传统方法(单次线性计算)时, 虽然在一定程度上实现了降功率控制, 但控制指令的计算误差较大, 导致降功率幅度有限, 其中 50 kW、200 kW 和 500 kW 光伏单元计算误差(光照强度为 1000 W/m<sup>2</sup> 时)分别为 76%、62.3%和 48.13%。而其在采用所提方法时, 经过迭代计算, 在第 3 次迭代即可获得较理想的控制效果。其中, 不同光照强度下、不同容量的光伏单元 DCC 的有功出力控制效果, 经 3 次计算的功率误差均在 5%以内, 因此,  $\varepsilon_1$  取 5%。

表 1 所提方法控制精度分析

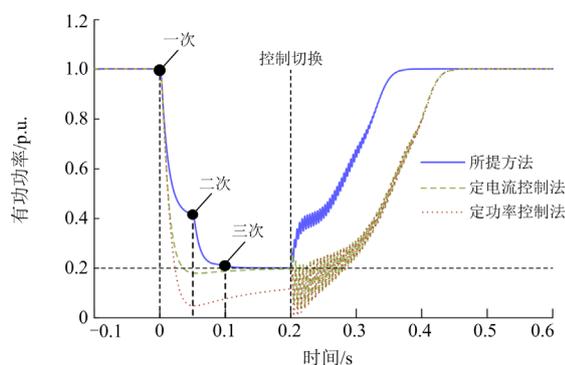
容量/ kW	光照强度/ (W/m <sup>2</sup> )	指令值/ kW	一次/ kW	二次/ kW	三次/ kW	三次 精度/%
50	1000	20	35.2	22.8	20.4	2.0
	600	10	19.4	11.6	10.2	2.0
	200	1	2.7	1.1	1.003	0.3
200	1000	100	162.3	116.8	103.3	3.3
	600	60	99.3	72.4	62.8	4.7
	200	10	22.4	11.8	10.2	2.0
500	1000	300	444.4	355.3	315.1	5.0
	600	100	194.1	115.3	101.9	1.9
	200	20	47.6	23.0	20.3	1.5

注：一、二、三次代表一、二、三次迭代后光伏单元输出的有功功率。

以 50 kW 光伏单元为对象, 并由理想电压源提供直流母线电压, 对比所提方法与定电流控制法和定功率控制法的区别, 结果如图 4 所示。由图 4 可知, 定电流控制法在故障发生时, 进入降功率模式后具有最快的响应速度, 能够快速达到控制目标。定功率控制法由于引入功率外环, 在所设置场景中



(a) 光伏阵列端口电压



(b) 光伏单元输出有功功率

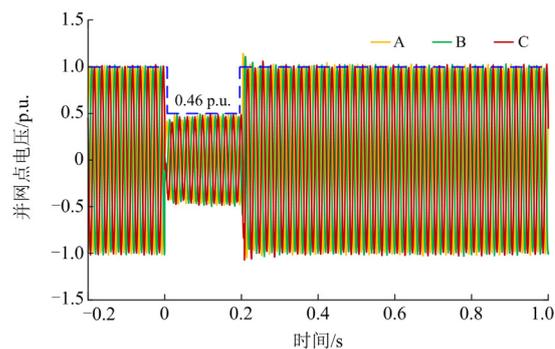
图 4 电网电压正常时不同方法的有功控制效果

Fig. 4 Active power control effects of different methods under normal grid voltage

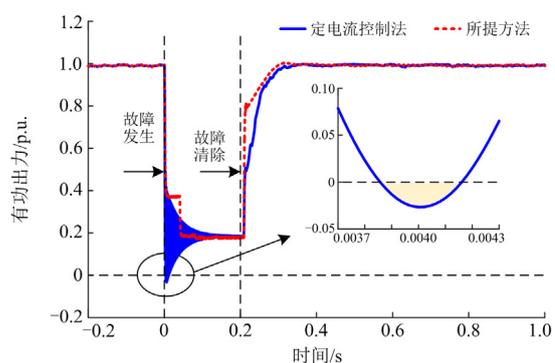
存在明显的控制偏差, 需要更加精确的控制参数来减小稳态误差和提升响应速度。此外, 相比于定电流控制法和定功率控制法, 所提方法在故障切除后, 光伏单元有功出力波动最小, 并且恢复速度最快。

### 3.2 电网电压暂降时所提方法实现效果

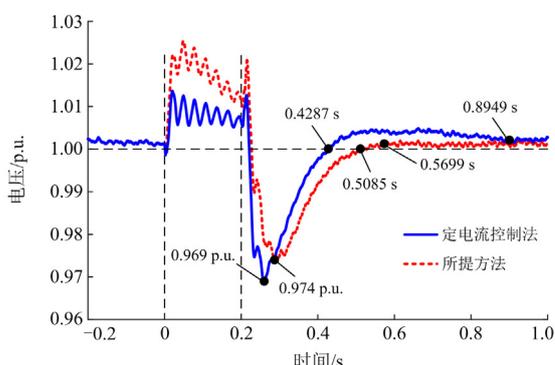
为充分验证所提方法的有效性, 在所搭建光伏直流并网系统中进行仿真测试。在交流送出线路中点设置对称故障, 过渡电阻设为  $10 \Omega$ , 结果如图 5 所示。



(a) 并网点电压



(b) 光伏单元DCC低压侧有功出力



(c) 直流母线电压

图 5 电网电压暂降时不同方法的有功控制效果

Fig. 5 Active power control effects of different methods under grid voltage dip

当电网电压暂降时, 为避免直流母线电压持续抬升, 光伏单元须配合并网变流器来降低有功出力。由图 5 可知, 采用定电流控制法和所提方法时, 均可将直流母线电压维持在安全范围(通常取 1.03~1.05 p.u.)内。然而, 采用定电流控制法时, 光伏单元进入降功率控制模式后, 出现明显的衰减振荡, 并导致光伏单元出现倒流现象(PV 有功出力小于 0), 对光伏单元的安全运行造成威胁。此外, 所提方法在故障清除后 0.5085 s 时恢复至额定直流电压, 在 0.5699 s 时进入稳定状态; 采用定电流控制法时, 在 0.4728 s 时即可恢复直流母线电压至其额定值, 然而, 进入稳定状态用时较长, 在 0.8949 s 时, 直流电压保持稳定。仿真结果说明所提方法能够有效实现降功率控制, 同时避免了光伏单元输出电流波动问题。

### 4 结论

本文针对交流故障下光伏单元控制环路切换导致的直流变流器低压侧显著电流波动甚至倒流的问题, 提出了一种基于功率自反馈迭代的有功控制方法。所提方法仅须修改光伏单元控制外环指令生成方式, 无须切换控制环路, 避免了光伏单元内部控制环路在短时间内的频繁切换, 减小了控制模式切换过程光伏直流变流器低压侧的电流波动。利用功率自反馈迭代的计算方式, 能够可靠计算光伏单元控制外环所需的端口电压参考值。此外, 采用单机尽量利用原则进行功率分配, 避免修改全体光伏单元控制模式, 减轻了中央控制器的计算负担。所提方法不需要额外耗能装置, 有效实现了光伏直流并网系统低电压穿越有功控制, 具有一定工程参考价值。

### 附录 A

图 A1 中:  $i_p$  为光伏单元 DCC 高压侧电流;  $L_1$  为电感;  $C_1$  和  $C_2$  分别为高压侧和低压侧电容;  $D_0$ — $D_4$  为二极管;  $D_5$  为防反二极管;  $T_0$ — $T_4$  为开关器件的控制信号。

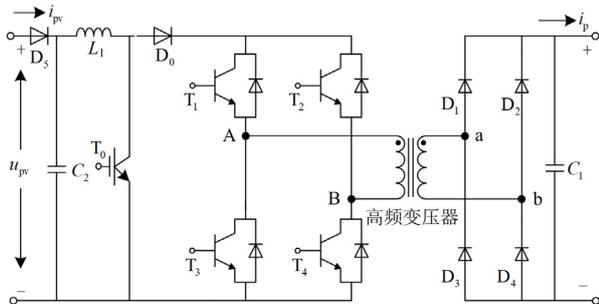


图 A1 光伏单元 DCC 内部拓扑结构

Fig. A1 Internal topology of PV DCC

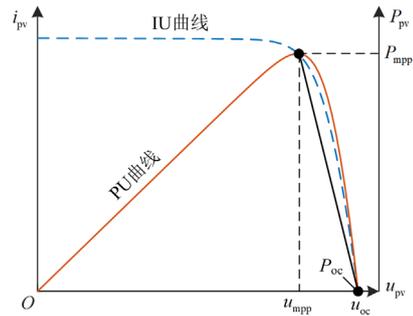


图 A2 光伏阵列 PU 和 IU 特性曲线

Fig. A2 PU and IU characteristic curve of PV panel

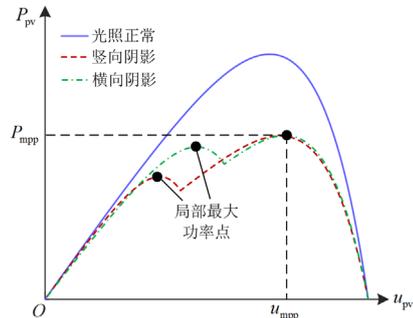


图 A3 局部阴影遮挡下光伏阵列 PU 特性曲线

Fig. A3 PU characteristic curve of PV panel under partial shadow

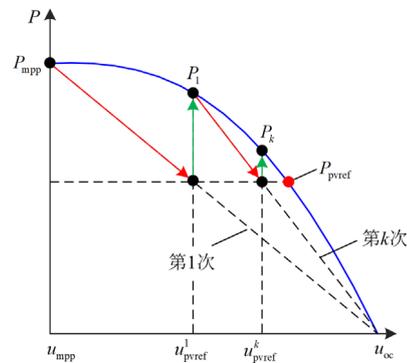


图 A4 所提方法实现原理

Fig. A4 Implementation principle of the proposed method

表 A1 仿真模型中变流器详细参数

Table A1 Parameters of converter in simulation model

变流器类型	参数名称	数值
DCC	稳压电容 $C_1/\mu\text{F}$	1400
	稳压电容 $C_2/\mu\text{F}$	200
	前级电路升压电感 $L_1/\text{mH}$	0.5
GCC	高频变压器变比	1:20
	额定容量/MVA	1.0
	额定直流电压/kV	$\pm 10$
	桥臂子模块数量	32
	子模块电容/ $\mu\text{F}$	1500

表 A2 仿真模型中交流电网详细参数

Table A2 Parameters of AC grid in simulation model

类型	参数名称	数值
GCC 升压变压器	额定容量/MVA	1.0
	连接方式	Ynd
	变比	110 kV/10.5 kV
交流电网	电压等级/kV	110

## 参考文献

- [1] 国务院办公厅. 国务院办公厅转发国家发展改革委国家能源局关于促进新时代新能源高质量发展实施方案的通知[EB/OL]. [2022-05-30]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/30/content\\_5693013.html](http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/30/content_5693013.html).
- [2] 马钊, 张恒旭, 赵浩然, 等. 双碳目标下配用电系统的新使命和新挑战[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 6931-6945.  
MA Zhao, ZHANG Hengxu, ZHAO Haoran, et al. New mission and challenge of power distribution and consumption system under dual-carbon target[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 6931-6945.
- [3] 马健, 樊艳芳, 王一波, 等. 适用于集中型光伏直流升压变换器的 MPPT 策略[J]. 太阳能学报, 2022, 43(5): 137-145.  
MA Jian, FAN Yanfang, WANG Yibo, et al. Maximum power point tracking strategy for centralized photovoltaic DC-DC converter[J]. Acta energiae solaris sinica, 2022, 43(5): 137-145.
- [4] 孙银锋, 李溶, 刘金鑫, 等. 大规模光伏电站经柔性直流并网系统故障穿越策略[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(2): 107-116.  
SUN Yinfeng, LI Rong, LIU Jinxin, et al. Fault traversal strategy for large-scale photovoltaic power station via flexible DC grid-connected system[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(2): 107-116.
- [5] 黄欣科, 王环, 周宇, 等. 兆瓦级光伏中压直流并网变换器研制及实证应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 150-157.  
HUANG Xinke, WANG Huan, ZHOU Yu, et al. Development and empirical application of megawatt-level medium-voltage DC photovoltaic grid-connected converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 150-157.
- [6] 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2012[S].
- [7] 何晋, 李智轩, 左金花, 等. 考虑多控制目标的IIDG低压穿越控制方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3): 92-101.  
HE Jin, LI Zhixuan, ZUO Jinhua, et al. A low voltage ride-through control method of IIDG considering multiple control targets[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 92-101.
- [8] NADERI S B, NEGEVITSK Y M, MUTTAQI K M. A modified DC chopper for limiting the fault current and controlling the DC-link voltage to enhance fault ride-through capability of doubly-fed induction-generator-based wind turbine[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2019, 55(2): 2021-2032.
- [9] 曹帅, 刘东, 赵成功. 适用于风电经柔性直流并网系统的柔性耗能装置及控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 51-62.  
CAO Shuai, LIU Dong, ZHAO Chengong. A flexible energy dissipation device with control strategy for and HVDC wind power integration system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 51-62.
- [10] 许彬, 高冲, 张静. 应用于海上风电接入的 VSC-HVDC 系统主网侧交流故障穿越的新型直流耗能装置拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 88-97, 400.  
XU Bin, GAO Chong, ZHANG Jing. A novel DC chopper topology for grid side fault ride through in VSC-HVDC based offshore wind power connection[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 88-97, 400.
- [11] 颜湘武, 王德胜, 隗小雪, 等. 风电机组故障穿越与频率调节风储联合控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 5911-5923.  
YANG Xiangwu, WANG Desheng, WEI Xiaoxue, et al. Research on the wind power-storage joint control based on fault ride-through and frequency regulation of wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 5911-5923.
- [12] MUSARRAT M N, FEKIH A. A fault-tolerant control framework for DFIG-based wind energy conversion systems in a hybrid wind/PV microgrid[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(6): 7237-7252.
- [13] 陈凌彬, 夏向阳, 李红, 等. 不对称故障下考虑光储出力的最优电压支撑策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 76-87.  
CHEN Lingbin, XIA Xiangyang, LI Hong, et al. An optimal voltage support strategy considering the photovoltaic and storage output under asymmetric faults[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 76-87.
- [14] NASIRI M, ARZANI A, GUERRERO J M. LVRT operation enhancement of single-stage photovoltaic power plants: an analytical approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5020-5029.
- [15] 徐可寒, 张哲, 刘慧媛, 等. 光伏电源故障特性研究及影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(2): 359-371.

- XU Kehan, ZHANG Zhe, LIU Huiyuan, et al. Study on fault characteristics and its related impact factors of photovoltaic generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(2): 359-371.
- [16] 王诗雯, 刘飞, 刘沁怡, 等. 不对称故障下两级式光伏并网系统低电压穿越控制[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 91-102.
- WANG Shiwen, LIU Fei, LIU Qinyi, et al. A low-voltage ride through control strategy for two-stage grid-connected photovoltaic system under asymmetrical faults[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 91-102.
- [17] 陈建福, 谭喆, 刘仁亮, 等. 基于改进鲁棒重复控制与QPR的光伏电流控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(3): 100-110.
- CHEN Jianfu, TAN Zhe, LIU Renliang, et al. Microgrid photovoltaic current control strategy based on improved robust repetitive control and QPR[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3): 100-110.
- [18] 何昭辉, 曹锐, 刘海鹏, 等. 利用虚拟阻抗及无功电流控制提高光伏故障电压支撑能力研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(5): 42-49.
- HE Zhaohui, CAO Rui, LIU Haipeng, et al. Research on improving photovoltaic fault voltage support capability by virtual impedance and reactive current control[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(5): 42-49.
- [19] 黄欣科, 王环, 卢俊龙, 等. 光伏中压直流变换器串联系统控制策略研究[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2327-2338.
- HUANG Xinke, WANG Huan, LU Junlong, et al. Research on series system and control strategy of photovoltaic medium voltage DC converter[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2327-2338.
- [20] KHAN H, CHACKO S J, FERNANDES B G, et al. Reliable and effective ride-through controller operation for smart PV systems connected to LV distribution grid under abnormal voltages[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(3): 2371-2384.
- [21] 贾科, 陈金锋, 赵冠琨, 等. 基于 MMC 二次谐波注入的光伏直流升压接入系统故障清除协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(增刊 1): 109-117.
- JIA Ke, CHEN Jinfeng, ZHAO Guankun, et al. Coordinated control strategy of photovoltaic DC boosting integration system during fault clearing based on MMC second harmonic injection[J]. Proceeding of the CSEE, 2019, 39(S1): 109-117.
- [22] 茆美琴, 余世杰, 苏建徽. 带有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1248-1251.
- MAO Meiqin, YU Shijie, SU Jianhui. Versatile matlab simulation model for photovoltaic array with MPPT function[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(5): 1248-1251.
- [23] 郑权. 具有参数的不带有导数的平方收敛的迭代法[J]. 计算数学, 2003(1): 107-112.
- ZHENG Quan. Parametric iterative methods of quadratic convergence without the derivative[J]. Numerical Mathematics, 2003(1): 107-112.
- [24] 毛明轩, 许钊, 崔立闯, 等. 基于改进灰狼优化算法的光伏阵列多峰 MPPT 研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(3): 450-456.
- MAO Mingxuan, XU Zhao, CUI Lichuang, et al. Research on multi-peak MPPT of photovoltaic array based on modified gray wolf optimization algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(3): 450-456.
- [25] 韩鹏, 李银红, 何璇, 等. 结合量子粒子群算法的光伏多峰最大功率点跟踪改进方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(23): 101-108.
- HAN Peng, LI Yinong, HE Xuan, et al. Improved maximum power point tracking method for photovoltaic multi-peak based on quantum-behaved particle swarm optimization algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 101-108.
- [26] TAVAKOLI S D, PRIETO-ARAUJO E, GOMIS-BELLMUNT O. AC fault ride through in MMC-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(4): 2775-2786.
- [27] 王炳楠, 谭占鳌. 中国典型 I 类辐照地区的光伏并网逆变器性能评价方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 139-145.
- WANG Bingnan, TAN Zhan'ao. Performance evaluation method of grid-connected photovoltaic inverter for typical type-I irradiation area of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 139-145.

收稿日期: 2023-08-04; 修回日期: 2023-09-24

作者简介:

李俊涛(1993—), 男, 博士研究生, 研究方向为新能源并网系统低电压穿越及其恢复控制; E-mail: ljtnctcm@163.com

贾科(1986—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源电力系统保护与控制、新型配电网故障定位; E-mail: ke.jia@ncepu.edu.cn

董学正(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网故障穿越。E-mail: dongxuezheng28@163.com

(编辑 姜新丽)